

0-787218

На правах рукописи



САДЕЕВ ТАГИР СУЛТАНОВИЧ

**ФОТОННЫЕ ФИЛЬТРЫ МИКРОВОЛНОВЫХ СИГНАЛОВ
НА ОСНОВЕ ОДНОЧАСТОТНОГО ЛАЗЕРА
И АМПЛИТУДНОГО ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА
МАХА-ЦЕНДЕРА**

**Специальность 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения»**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Казань - 2011

Работа выполнена в Национальном исследовательском университете
ГОУ ВПО Казанский государственный технический университет
им. А.Н. Туполева

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Морозов Олег Геннадьевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
кафедры Радиоэлектронных
и телекоммуникационных систем
Надеев Адель Фирадович,
профессор Казанского государственного
технического университета им. А.Н. Туполева

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000585000

кандидат технических наук, доцент кафедры
Линий связи и измерения в технике связи
Бурдин Антон Владимирович, доцент
Поволжского государственного университета
телекоммуникаций и информатики, г. Самара

Ведущая организация: ГОУ ВПО Уфимский государственный
авиационный технический университет, г. Уфа

Защита состоится 22 апреля 2011 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного
совета Д 212.079.04 при Казанском государственном техническом университе-
те им. А. Н. Туполева по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.31

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью организа-
ции, высылать по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государст-
венного технического университета имени А. Н. Туполева

С авторефератом диссертации можно ознакомиться на сайте Казанского
государственного технического университета имени А. Н. Туполева www.kai.ru

Автореферат разослан «21» марта 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Седов С. С.

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные методы и алгоритмы обработки микроволновых сигналов в оптическом диапазоне длин волн применяются в различных радиотехнических системах приема, передачи и обработки информации, радиолокации, формирования диаграммы направленности фазированных антенных решеток, генерации сигналов опорной частоты и их передачи по оптическому волокну, преобразования частоты и др., а также в телекоммуникационных системах типа ROF (от англ. - *Radio Over Fiber*) и широкополосного доступа (IEEE 802.16, UMTS и др.).

Задача обеспечения требуемых характеристик фильтрации сигналов микроволнового диапазона в данных системах решается путем использования фотонных (полностью оптических) фильтров. Под фотонными фильтрами микроволновых сигналов (ФФМС) понимается система, подобная по структуре и принципу действия традиционному цифровому фильтру, но обрабатывающая микроволновые сигналы в оптическом диапазоне. Вариант такого фильтра представлен на рис. 1,а. Основными его узлами являются источники опорного излучения ЛД на длинах волн λ_1 - λ_N , формирующие коэффициенты, из которых синтезируется фильтр, ЭОМ, который в данном случае выполняет функцию информационной микроволновой модуляции полученных коэффициентов, а в общем случае может быть использован при их формировании (см. рис. 1,б), а также ДУ, создающее временную задержку T для каждого из N коэффициентов. В итоге формируется АЧХ фильтра, подобная показанной на рис. 1,в.

Системная функция ФФМС с конечным числом коэффициентов фильтра определяется как $H(z) = \sum_{i=0}^N a_i z^{-i}$, где a_i – коэффициенты, (модулированные частоты оптического диапазона); $z = \exp(j\omega T)$, T – временная задержка, вносимая ДУ, зависящая от длины волны каждого коэффициента (частоты оптического сигнала).

Кроме варианта, приведенного выше, существует широкий спектр ФФМС, реализованных на широкополосных источниках излучения, перестраиваемых решетках Брэгга, полупроводниковых усилителях, модуляционных электрооптических преобразователях и т.д. Модуляционные методы формиро-

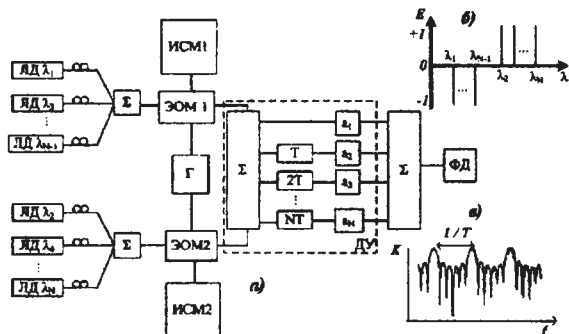


Рис. 1. ФФМС. ЛД – лазерный диод. Г – генератор микроволновых сигналов. Т – временная задержка. а, в – весовой коэффициент, ЭОМ – электрооптический модулятор, ФД – фотодиод, ДУ – дисперсионное устройство, ИСМ – источник смещения рабочей точки

вания коэффициентов фильтров, выделенные нами как наиболее перспективные, являются объектом исследования настоящей диссертации.

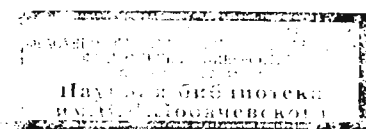
Для ФФМС основными являются динамические, статические и конструктивные характеристики. Под динамическими характеристиками понимается возможность перестраивать селективные параметры устройства (ширина полосы пропускания, центральная частота, ослабление в канале задержки) и возможность принципиально изменять его конфигурацию, т.е. вид частотной характеристики, например, от полосового к НЧ – или ВЧ – фильтру. Под статическими – понимается стабильность характеристик фильтра при изменении амплитудных, фазовых и частотных соотношений его коэффициентов, вызванных отклонениями параметров их формирования от оптимальных. Конструктивные характеристики определяют возможность реализации миниатюрных ФФМС, в т.ч. для бортовых радиотехнических систем, и создание полностью оптических сетей обработки микроволновых сигналов.

Необходимо отметить, что синтезом ФФМС занимаются многие коллективы специалистов, как в России, так и за рубежом. Значительный объем информации по проблеме модуляционных методов преобразования частоты содержится в трудах Гуляева Ю.В., Застрогина Ю.Ф., Гринева А.Ю., Тychинского В.П., Польского Ю.Е., Ильина Г.И., Морозова О.Г. и др. Вопросу применения модуляции в задаче получения требуемого числа оптических коэффициентов фильтра посвящена работа Ю. Вана. Вопросу реализации коэффициентов фильтров различного знака посвящены работы Я. Яо, Д. Пастора, Ф. Женга, Р. Минасна, С. Блза, Х. Капмана.

Анализ результатов, полученных при эксплуатации известных разработок ФФМС, показывает, что все они в той или иной степени не удовлетворяют требованиям по реализации указанных выше характеристик либо по возможности создания полосовых и ВЧ-фильтров, перестройки АЧХ, либо по её стабильности при отклонениях параметров модуляционного преобразования от оптимальных, либо по числу узлов и блоков, используемых при реализации ФФМС.

Это объясняется отсутствием решения широкого круга теоретических и практических вопросов, как для процессов формирования требуемого количества коэффициентов фильтра, так и их знака.

Одним из таких вопросов является поиск путей позволяющих реализацию частотных характеристик полосовых и ВЧ-фильтров. Для синтеза таких фильтров требуется формирование отрицательных коэффициентов. В представленной на рис. 1,а системе отрицательные коэффициенты (см. рис. 1,б) обеспечиваются модуляцией излучения массива ЛД $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N-1}$ микроволновым сигналом на отрицательном склоне модуляционной характеристики ЭОМ, а положительные – на положительном склоне. Склон, на котором осуществляется модуляция, определяется положением рабочей точки, которое задается амплитудой напряжения смещения от ИСМ. Число коэффициентов в данной системе определяется количеством ЛД. Следует также подчеркнуть, что большинство публикаций, посвященных реализации ФФМС, содержат решение лишь частных вопросов. Мало внимания уделено возможности изменения конфигураций фильтров,



практически не исследуются их статические характеристики. Эти обстоятельства не позволяют сделать обоснованный выбор способа модуляционного преобразования частоты источника оптического излучения, который обеспечит требуемое число коэффициентов и их знак для реализации заданной АЧХ фильтра.

Отмеченные выше обстоятельства определяют актуальность разработки принципов построения ФФМС на основе модуляционного преобразования одночастотного лазерного излучения в электрооптических модуляторах, построенных на базе интерферометров Маха-Цендера (ЭОММЦ), как наиболее перспективного с позиций улучшения динамических, статических и конструктивных характеристик фильтров указанного класса.

Представляемая диссертационная работа посвящена решению поставленных вопросов. Тематика, постановка задач и содержание работы соответствуют планам научных исследований, являющихся составной частью Федеральной программы развития Национального исследовательского университета Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева (КГТУ-КАИ) и аналитической ведомственной целевой программы Минобрнауки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009 – 2011 годы)», выполняемых на кафедре Телевидения и мультимедийных систем и в НОЦ «Волоконно-оптические технологии» КГТУ-КАИ.

Цель работы состоит в решении важной научно-технической задачи улучшения динамических, статических и конструктивных характеристик фотонных фильтров микроволновых сигналов.

Основная задача научных исследований: разработка принципов построения, методов анализа и синтеза фотонных фильтров микроволновых сигналов, построенных на основе модуляционного преобразования одночастотного лазерного излучения в электрооптических модуляторах Маха-Цендера.

Решаемые задачи.

1. Анализ характеристик существующих и перспективных ФФМС; выявление резервов для улучшения их динамических, статических и конструктивных характеристик; определение на этой основе направлений дальнейших научных исследований.

2. Исследование и сопоставительный анализ методов модуляционного преобразования и соответствующих им выходных сигналов ЭОММЦ в различных рабочих точках их модуляционных характеристик по напряженности электрического поля с позиций формирования требуемого числа и знака коэффициентов ФФМС; обоснование необходимости использования амплитудного ЭОММЦ для улучшения динамических, а на их основе статических и конструктивных характеристик ФФМС.

3. Теоретическое исследование статических характеристик ФФМС, построенных на основе одночастотного лазера и амплитудного ЭОММЦ, с позиций анализа и численной оценки искажений структурного состава коэффициентов фильтра и формируемых АЧХ, вызванных отклонениями параметров модуляции от оптимальных; разработка методов и структурных схем блоков для по-

вышения стабильности амплитудных и частотных характеристик формируемых коэффициентов и улучшения статических характеристик ФФМС в целом.

4. Проектирование и создание с использованием разработанных методов ФФМС на основе одночастотного лазера и амплитудного ЭОММЦ с позиций улучшения конструктивных характеристик фильтров указанного класса; экспериментальное исследование динамических, статических и конструктивных характеристик разработанных ФФМС; внедрение результатов работы для создания перспективных радиотехнических систем с обработкой микроволновых сигналов в оптическом диапазоне.

Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов.

В процессе выполнения работы на различных ее этапах использовались эмпирические и теоретические методы исследований: математическое моделирование, вероятностные методы и статистическая обработка экспериментальных результатов. При анализе спектральных структур коэффициентов ФФМС использован аппарат дискретного преобразования Фурье, метод z-преобразования и другие методы анализа линейных дискретных систем.

Обоснованность и достоверность результатов определяются использованием известных положений фундаментальных наук, корректностью используемых математических моделей и их адекватностью реальным физическим процессам модуляции; совпадением теоретических результатов с данными экспериментов и результатами исследований других авторов; экспертизами ФИПС с выдачей патента РФ.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что:

1. Проведен анализ существующих и перспективных ФФМС; определены пути улучшения их динамических, статических и конструктивных характеристик, основанные на модуляционных методах формирования коэффициентов фильтра, реализуемых с помощью электрооптического преобразования одночастотного лазерного излучения в многочастотное.

2. Проведено исследование и сопоставительный анализ методов модуляционного преобразования и соответствующих им выходных сигналов ЭОММЦ различных типов по напряженности электрического поля с позиций формирования требуемого числа и знака коэффициентов. Получены соотношения, позволяющие качественно и количественно оценить спектральную структуру коэффициентов фильтра при работе модуляторов в различных рабочих точках модуляционной характеристики и определить соответствующие им синтезируемые частотные характеристики ФФМС. Впервые показано получение отрицательных коэффициентов, достигаемое модуляционным преобразованием одночастотного лазерного излучения в нулевой и максимальной рабочей точке амплитудного ЭОММЦ, что принципиально необходимо для синтеза полосовых фильтров и фильтров высоких частот. Обосновано использование однопортового амплитудного ЭОММЦ для улучшения динамических, а на их основе статических и конструктивных характеристик ФФМС.

3. С использованием полученных соотношений проведены теоретические исследования статических характеристик ФФМС, построенных на основе одно-

частотного лазера и однопортового амплитудного ЭОММЦ, с позиций анализа и численной оценки искажений структурного состава коэффициентов фильтра и формируемых АЧХ, вызванных отклонениями параметров модуляции от оптимальных. Показано, что статистические характеристики ФФМС в большей степени определяется стабильностью положения рабочей точки модулятора. Предложены методы и структурные схемы блоков для повышения стабильности амплитудных и частотных характеристик формируемых коэффициентов и улучшения статистических характеристик ФФМС в целом.

4. На основе разработанных методов с учетом необходимости улучшения конструктивных характеристик фильтров указанного класса спроектирован и создан ФФМС на основе одночастотного лазера и амплитудного ЭОММЦ. Проведены экспериментальные исследования, подтвердившие результаты теоретических оценок по улучшению динамических, статических и конструктивных характеристик ФФМС.

Практическая ценность полученных результатов. Совокупность результатов, полученных в процессе выполнения диссертационной работы, убедительно доказывает возможность создания ФФМС на основе одночастотного лазера и однопортового амплитудного ЭОММЦ с улучшенными характеристиками. Подтверждением этому являются разработанные экспериментальные образцы ФФМС и результаты их исследований. При этом достигается улучшение динамических, статических и конструктивных характеристик ФФМС, выражающееся: в возможности перестройки селективных параметров АЧХ фильтров с помощью изменения параметров лишь одного управляющего сигнала; выигрыше в 2-3 раза по стабильности полосы пропускания фильтра за счет применения методов стабилизации положения рабочей точки модулятора; упрощении конструкции, снижении стоимости и повышении надежности ФФМС.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы, реализованные в виде опытных образцов ФФМС, данных теоретических и экспериментальных исследований, методик проектирования и расчета внедрены на ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» (г. Пермь), в научно-исследовательский процесс НИУ КГТУ-КАИ и ГОУВПО ПГУТИ (г. Самара) при выполнении госбюджетных и хоздоговорных работ, в учебный процесс Казанского филиала ГОУВПО ПГУТИ (г. Казань). Научно-технические результаты работы используются при выполнении НИР по Федеральной программе развития Национального исследовательского университета КГТУ-КАИ и аналитической ведомственной целевой программы Минобрнауки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009 – 2011 годы)».

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертационной работы докладывались на XIV – XVII Международных молодежных НТК «Туполевские чтения» в 2006-2009 г.г., VI Всероссийской молодежной научной школе «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» Саранск 2007 г., V - IX Международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов» 2006 – 2010 г.г., VI - VIII Международной научно-технической конференции «Оптические тех-

нологии в телекоммуникациях» 2008 – 2010 г.г., III - IV Российском семинаре по волоконным лазерам 2009 - 2010 г., Международной конференции по лазерам, приложениям и технологии ICONO/LAT Казань 2010 г. Материалы диссертации использовались в проекте «Распределенный волоконно-оптический датчик физических полей», получивший награду на конкурсе «50 лучших инновационных идей для РТ» в 2010г. в номинации «Старт инноваций».

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 20 работ, в том числе три статьи в изданиях согласно Перечню ВАК, один патент на полезную модель, шесть статей в иностранных журналах и десять работ в трудах Международных и Всероссийских научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы, включающего 134 наименования, и двух приложений. Работа без приложений изложена на 141 странице машинописного текста, включая 40 рисунков и 6 таблиц.

Основные положения, представляемые к защите.

1. Результаты сравнительного анализа ФФМС, построенных на основе модуляционных и немодуляционных методов; рекомендации по выбору путей улучшения динамических, статических и конструктивных характеристик фильтров, основанных на модуляционных методах формирования их коэффициентов, реализуемых с помощью электрооптического преобразования одночастотного лазерного излучения в многочастотное.

2. Результаты исследования и сопоставительного анализа методов модуляционного преобразования и соответствующих им выходных сигналов ЭОММЦ различных типов по напряженности электрического поля с позиций формирования требуемого числа и знака коэффициентов. Оценка спектральной структуры коэффициентов фильтра и определение соответствующих им синтезируемых АЧХ ФФМС. Метод получения отрицательных коэффициентов, достигаемый модуляционным преобразованием одночастотного лазерного излучения в нулевой и максимальной рабочей точке амплитудного ЭОММЦ; рекомендации по использованию однопортового амплитудного ЭОММЦ для улучшения динамических, а на их основе статических и конструктивных характеристик ФФМС.

3. Результаты исследования статических характеристик ФФМС, построенных на основе одночастотного лазера и однопортового амплитудного ЭОММЦ, с позиций анализа и численной оценки искажений структурного состава коэффициентов фильтра и формируемых АЧХ, вызванных отклонениями параметров модуляции от оптимальных. Метод и структурные схемы блоков повышения стабильности амплитудных и частотных характеристик формируемых коэффициентов, обеспечивающих улучшение статических характеристик ФФМС в целом.

4. Результаты проектирования, создания, экспериментальных исследований и внедрения ФФМС на основе одночастотного лазера и амплитудного ЭОММЦ с улучшенными динамическими, статическими и конструктивными характеристиками.

2 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика диссертационной работы: актуальность, цель, задачи исследований, научная новизна и практическая значимость, методы исследований, достоверность, реализация и внедрение полученных результатов, апробация и публикации, основные защищаемые положения. Приведены структура и краткое содержание диссертации.

В первой главе рассмотрены основные характеристики ФФМС и причины, ограничивающие возможности селективных устройств указанного класса. Проанализировано современное состояние работ по созданию методов и средств обеспечения необходимого числа коэффициентов фильтра, их знака и значения для реализации требуемой частотной характеристики. В главе приведены результаты сравнительного анализа ФФМС по виду реализуемых частотных характеристик и возможности перестройки, особенностям реализации, стабильности параметров.

Анализ основных характеристик ФФМС показал, что для расширения их функциональных возможностей необходимо решение проблем, вызванных ограничением по виду реализуемых частотных характеристик. Ограничение обусловлено тем, что когда обработке подвергаются положительные коэффициенты – составляющие интенсивности оптического сигнала, модулированные радиочастотой, то реализуются фильтры с передаточными характеристиками фильтров низких частот. Недостаток заключается в невозможности реализации полосовых и высокочастотных фильтров, для синтеза которых является необходимым получение и обработка отрицательных коэффициентов – оптических компонент с начальной фазой π . Другое ограничение на виды реализуемых частотных характеристик накладывает обеспечение необходимого числа коэффициентов. На преодоление указанных ограничений направлено применение модуляционных методов получения компонент оптических излучений с противоположной фазой. Однако, решение этих проблем на основе модуляционных методов не всегда позволяет реализовать ФФМС с требуемыми динамическими, статическими и конструктивными характеристиками, но имеет дальнейшую перспективу развития.

Критическое рассмотрение сложившегося положения, показало, что использование указанного типа ФФМС во многом осложняется ограниченными возможностями существующих методов и средств модуляционного преобразования частоты. Данный вывод явился следствием нескольких взаимосвязанных причин.

Первая причина, обусловленная особенностями формирования динамических характеристик ФФМС, заключается в применении либо многоступенчатых, либо многокаскадных процедур модуляционного преобразования с целью получения отрицательных коэффициентов фильтров.

Вторая причина, обусловленная особенностями формирования статических характеристик ФФМС, определяется полным отсутствием информации о стабильности коэффициентов фильтра при отклонении параметров модуляци-

онного преобразования от оптимальных. В большинстве работ демонстрируются лишь факт создания того или иного типа фильтров, но не поведение их характеристик в процессе работы.

Третья причина, обусловленная особенностями конструктивных характеристик ФФМС, может быть сформулирована следующим образом. При реально достижимых высоких показателях по динамическим и статическим характеристикам ФФМС достигается и конструктивная простота их синтеза, заключающаяся в использовании, например, лишь одного модулятора. Однако, специальный характер структуры данного модулятора, его единичное изготовление и высокая стоимость сводят на нет преимущества по другим характеристикам.

Резюмируя сказанное выше, анализ возможных путей решения этих проблем может опираться на преимущества модуляционных методов с учетом опыта их применения в устройствах и приборах других классов, например, генераторах гребенчатых спектров, системах удаленного гетеродинирования базовых станций, тем более что указанные разработки широко применяются в смежной технологии ROF-сетей. Кроме того, следует обратить внимание на применение модуляционных методов в кристаллических модуляторах и особенностях формирования их выходных сигналов в различных рабочих точках особенно при реализации амплитудно-фазовых типов модуляции¹.

Таким образом, в результате исследований, проведенных в первой главе, определены пути улучшения динамических, статических и конструктивных характеристик ФФМС, основанные на модуляционных методах формирования коэффициентов фильтра, реализуемых с помощью электрооптического преобразования одночастотного лазерного излучения в многочастотное. Сформулированы цель диссертационной работы и перечень основных задач, решение которых необходимо для достижения поставленной цели.

Во второй главе с позиций формирования требуемого числа и знака коэффициентов ФФМС проведены исследования выходных сигналов ЭОММЦ в различных рабочих точках модуляционной характеристики по напряженности электрического поля; дано обоснование необходимости использования амплитудного (А) ЭОММЦ для улучшения динамических, а на их основе статических и конструктивных характеристик ФФМС.

Для сравнения были выбраны ЭОММЦ фазового типа, а также одно- и двухпортовые амплитудного. Проанализированы возможные синтезируемые АЧХ фильтров, коэффициенты которых формируются данными устройствами при различных параметрах модулирующего сигнала.

Впервые показано, что при работе АЭОММЦ в нулевой рабочей точке синтезируется двухчастотный сигнал, состоящий из противофазных составляющих, что говорит о синтезе отрицательного коэффициента. Анализ выражения (1), описывающего выходной сигнал АЭОММЦ в нулевой рабочей точке,

¹ А 1338647 SU 4 G02F 1/03. Способ преобразования одночастотного когерентного излучения в двухчастотное / Ильин Г.И., Морозов О.Г. (Казан. авиац. ин-т им. А.Н. Туполева). №3578456/31-25; Заявл. 13.04.83; Опубл. 20.04.2004.

показывает, что при увеличении глубины модуляции b возможно получение большего числа коэффициентов:

$$E_{\text{вых}}(t) = -2j \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{j\omega t} \times \left[2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(b) \left[\frac{e^{j(2n-1)\omega_{\text{PC}} t} - e^{-j(2n-1)\omega_{\text{PC}} t}}{2j} \right] \right], \quad (1)$$

где E_0 – амплитуда электрического поля входного немодулированного оптического сигнала, ω – постоянная циклическая частота немодулированного оптического сигнала, b – коэффициент модуляции, ω_{PC} – постоянная циклическая частота модулирующего радиочастотного сигнала.

Полосы спектральных составляющих расположены симметрично относительно подавленной несущей, сами составляющие находятся на частотах $\omega = \omega_0 \pm n\omega_{\text{PC}}$, где $n=1,3,5...$ Четные составляющие подавлены. Начальные фазы составляющих нижней полосы отличны на π от начальной фазы составляющих верхней полосы, что говорит о формировании отрицательных коэффициентов.

Зависимость АЧХ фильтров, коэффициенты которых формируются в указанном выше режиме работы АЗОММЦ, от глубины модуляции b , показана на рис.2.

Также впервые показана возможность формирования отрицательных коэффициентов, когда рабочая точка задается в максимуме модуляционной характеристики.

Спектр выходного колебания

состоит из несущего колебания, а также верхней и нижней полосы с составляющими на частотах $\omega = \omega_0 \pm n\omega_{\text{PC}}$, где $n=0,2,4,6, \dots$ Составляющие одного порядка n имеют равные начальные фазы, но противоположные по отношению к соседним составляющим, что подтверждается следующим выражением:

$$E_{\text{вых}}(t) = 2 \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{j\omega t} \times \left[J_0(b) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(b) \left[\frac{e^{j(2n)\omega_{\text{PC}} t} + e^{-j(2n)\omega_{\text{PC}} t}}{2} \right] \right] \quad (2)$$

Анализ (2) показывает, что разнос составляющих спектра равен удвоенной модулирующей частоте, нечетные составляющие подавлены. ФММС, коэффициенты которого формируются в указанном режиме работы АЗОММЦ, при различных b характеризуются АЧХ, показанными на рис.3.

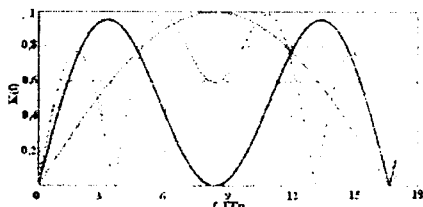


Рис. 2. Точечная линия – $b=0,49$ соответствует ФММС (-1,1); сплошная – $b=3$ (-1,-1,1,1); штриховая – $b=5,3$ (-0,88, -0,88, 1, -1, 0,88, 0,88)

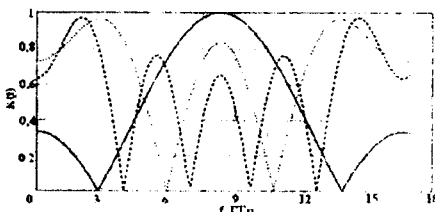


Рис. 3. Сплошная линия – $b=1,3$ соответствует ФММС (-1,1,-1); точечная – $b=3,6$ (0,53, -1, -0,93, -1, 0,53); штриховая – $b=6,6$ (-1, 0,69, 0,93, 0,88, 0,93, 0,69, -1)

ФФМС, коэффициенты которого формируются с помощью фазового модуляционного преобразования частоты, позволяют реализовать ограниченное разнобразное АЧХ, представленное на рис. 4.

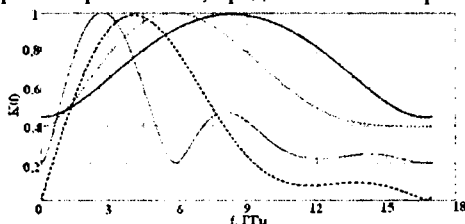


Рис. 4. Сплошная толстая линия - $b=0,34$ соответствует ФФМС $(-1, 1, 1)$; точечная - $b=1,43$ $(-0,48, -1, 1, 1, 0,48)$; штриховая - $b=2,4$ $(-0,38, -0,83, -1, 0, 1, 0,83, 0,38)$; тонкая сплошная - $b=3,8$ $(-0,6, -1, -0,95, 0, -0,95, 0, 0,95, 1, 0,6)$

АЧХ фильтров, реализованные на двухпортовом АЭОММЦ, близки характеристикам, полученным для фильтра на однопортовом АЭОММЦ, однако при этом необходимо выполнение дополнительных условий, а именно, обеспечение согласования фаз модулирующих сигналов, а также переключение разности прилагаемых напряжений смещения нулю и полуволновому при переконфигурации ФФМС.

Анализ полученных результатов говорит о преимуществах применения однопортового АЭОММЦ в формировании требуемого числа и знака коэффициентов фильтра. Данное преимущество заключается в реализуемых фильтром высоких динамических характеристиках, обусловленных возможностью изменять конфигурацию путем переключения положения рабочей точки и изменения глубины модуляции, и конструктивных – показано решение комплексной задачи формирования коэффициентов и их знаков, в том числе отрицательных, с помощью единого устройства при изменении параметров одного управляющего сигнала.

Полученные соотношения также позволяют качественно и количественно оценить искажения АЧХ, вызванные отклонениями параметров модуляционного преобразования от оптимальных, для определения статистических характеристик фильтра, которые рассмотрены в третьей главе.

В начале главы проведено моделирование передаточной характеристики ФФМС с коэффициентами $(-1; 1)$ на основе одночастотного источника излучения и однопортового АЭОММЦ со смещением в «нулевой» рабочей точке. В результате получено выражение коэффициента передачи ФФМС (3):

$$K(\omega) = \sin\left[\frac{z\pi c}{\omega^2} D \omega_{pc} \Omega\right] = \sin\left[\frac{z\lambda_0}{2\omega_0} D \omega_{pc} \Omega\right] = \sin\pi f_{pc} T, \quad (3)$$

где D – дисперсия оптического волокна [пс/нм/км], z – расстояние [км], λ_0 – центральная длина волны [нм], ω_0 – циклическая частота, соответствующая центральной длине волны [рад/с], Ω – частотный интервал между оптическими коэффициентами ФФМС [рад/с], ω_{pc} – циклическая частота сигнала в канале фильтрации [рад/с], T – задержка, вводимая дисперсионным устройством [с]. Данные результаты были подтверждены путем виртуального моделирования ФФМС в среде Optisystem™ 7.0.

На базе данной характеристики и полученных во второй главе соотношений впервые исследованы искажения АЧХ ФФМС, вызванные отклонениями параметров модуляционного электрооптического преобразования одночастотного лазерного излучения в АЭОММЦ от оптимальных. Анализ зависимости полосы пропускания фильтра Δf и ослабления в полосе задержки Q от нестабильности амплитуды модулирующего напряжения проводился в отношении рассчитываемого коэффициента нелинейных искажений $K_{ни}$:

$$K_{ни} = \sqrt{[(E_4^2/2) + (E_6^2/2) + \dots]/[E_0^2 + (E_2^2/2)]}. \quad (4)$$

Показано уменьшение полосы пропускания и ухудшение вносимого затухания в полосе задержки в допустимом диапазоне $K_{ни}$ 0,28 ГГц и 1,15 дБ на единицу $K_{ни}$ соответственно.

Следующие результаты были получены при исследовании влияния на характеристики ФФМС стабильности положения рабочей точки на модуляционной характеристике. Рассматривался случай смещения рабочей точки в положительную и отрицательную области. Анализ проводился также из расчета на единицу $K_{ни}$.

При положительном смещении рабочей точки наблюдается сдвиг центральной частоты f_0 канала пропускания в высокочастотную область и составляет 30 МГц, уменьшение полосы пропускания Δf составляет 67 МГц. В нижней полосе задержки фильтра происходит усиление паразитного канала пропускания на 1,21 дБ, а в верхней полосе наблюдается значительное подавление. Частотная характеристика в высокочастотной области полосы пропускания становится пологой, завал АЧХ составляет 0,02 дБ на единицу $K_{ни}$, а в НЧ области становится более крутой и равна 0,07 дБ на единицу $K_{ни}$ (рис.5).

При отрицательном смещении рабочей точки сдвиг центральной частоты канала пропускания равен 33 МГц. Сужение полосы пропускания Δf составляет 60 МГц. В нижней полосе задержки фильтра происходит улучшение подавления паразитного канала про-

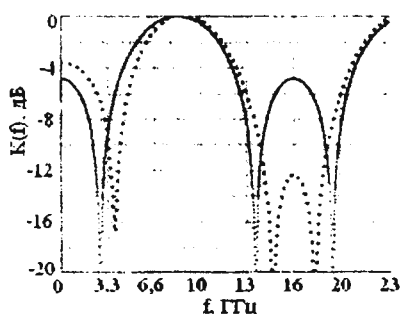


Рис. 5. Частотные характеристики ФФМС: сплошная линия – при оптимальном положении рабочей точки, точечная линия – при смещении на +10 град

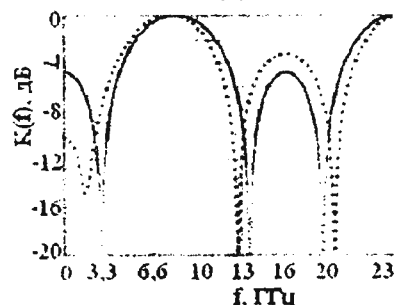


Рис. 6. Частотные характеристики ФФМС: сплошная линия – при оптимальном положении рабочей точки, точечная линия – при смещении на -10 град

пускания на 4,6 дБ, а в верхней полосе наблюдается ухудшение на 2,2 дБ на ед. $K_{\text{нн}}$ (рис.6). Деградация вида частотной характеристики в области основной полосы пропускания зеркальна случаю положительного смещения рабочей точки. Влияние нестабильности частоты модулирующего сигнала, составляющая величину до единиц процентов, приводит к отклонению от оптимального значения центральной частоты канала пропускания f_0 и полосы пропускания Δf на ту же величину с тем же знаком.

Исследования статических характеристик ФФМС указали на возможные пути их улучшения, заключающиеся в реализации способов контроля спектральных характеристик фильтра, стабильность которых в большей степени определяется стабильностью положения рабочей точки на модуляционной характеристике. Методы и средства стабилизации положения рабочей точки представлены в четвертой главе диссертации.

Четвертая глава посвящена проектированию и созданию с использованием разработанных выше методов ФФМС на основе одночастотного лазера и амплитудного ЭОММЦ с позиций улучшения конструктивных характеристик фильтров указанного класса, а также экспериментальному исследованию динамических, статических и конструктивных характеристик разработанных ФФМС.

Экспериментальная установка содержала однопортовый АЭОММЦ МЗМ-Х-010-03, источник оптического излучения EXFO FLS-2600, фотоприемное устройство (ФПУ) FDI, осциллограф LeCroy WaveAce 101, генератор сигналов Г4-158А. Контролировалась частота сигнала на выходе ФПУ при приеме излучения на длине волны 1550 нм, прошедшего через модулятор, на который подавалось напряжение смещения и модулирующее напряжение частотой 100 МГц с генератора Г4-158А. Было зарегистрировано удвоение частоты модулирующего напряжения при постоянном смещении модулятора, равном полуволновому. При положении рабочей точки на линейном участке на выходе ФПУ наблюдался сигнал частоты генератора. Результат этого экспериментального исследования подтвердил возможность использования амплитудного модулятора в качестве устройства преобразования одночастотного излучения в двухчастотное.

Способ синтеза полосового и ВЧ-фильтров, основанный на использовании АЭОММЦ со смещением в нулевой и максимальной рабочей точке, был впервые экспериментально апробирован в лаборатории ОАО ПНППК (г. Пермь). ФФМС был реализован на установке, состоящей из канала формирования коэффициентов (КФК) и канала фильтрации микроволнового сигнала (КФМС). КФК содержал источник лазерного излучения EXFO FLS-2600 и широкополосный модулятор JDSU-10 со смещением в нулевой, а затем максимальной рабочей точке. На модулятор подавалось управляющее напряжение сначала с частотой 5 ГГц, а затем 10 ГГц от высокочастотного генератора SMR-20 для каждого из положений рабочей точки. Подавление несущей и удвоение частоты разноса коэффициентов ФФМС до $f=10$ ГГц и $f=20$ ГГц соответственно фиксировалось с помощью платформы EXFO FTB-500 с модулем анализатора

спектра FTV-5240. Выходное волокно КФК было подключено ко входу КФМС, состоящего из второго модулятора JDSU-10 и волоконной решетки Брэгга с дисперсией $D=1100$ пс/нм. На модулятор КФМС со смещением на линейном участке модуляционной характеристики подавалось управляющее напряжение от второго генератора SMR-20.

Частотные характеристики ФФМС регистрировались на анализаторе спектра радиочастот FSP-30, для чего частота управляющего напряжения второго генератора SMR-20 изменялась от 10 МГц до 20 ГГц при постоянной амплитуде. Полученные характеристики для случая «нулевой» рабочей точки представлены на рис. 7, а для случая максимальной – на рис. 8. Для случая «нулевой» рабочей точки и спектральном разnose оптических коэффициентов 20 ГГц максимум характеристики находится на частоте 2,96 ГГц, провалы – на нулевой частоте и 6,1 ГГц. При уменьшении спектрального разноса до 10 ГГц наблюдался сдвиг резонанса с частоты 2,96 на частоту 6,2 ГГц и провала АЧХ с 6,1 на 12,1 ГГц. Для случая максимальной рабочей точки и спектральном разnose оптических коэффициентов 20 ГГц максимум характеристики находится на частоте 3 ГГц, ширина полосы пропускания составляет 2,56 ГГц.

При уменьшении спектрального разноса до 10 ГГц наблюдался сдвиг центральной частоты до значения 5,8 ГГц и увеличение полосы пропускания до 5,1 ГГц. Значения частот провалов и резонансов близки к расчетным. Вблизи границы полосы пропускания фотоприемника погрешность не превышает 3,9%. Расхождение объясняется различными дисперсионными и поляризационными свойствами волоконной ре-

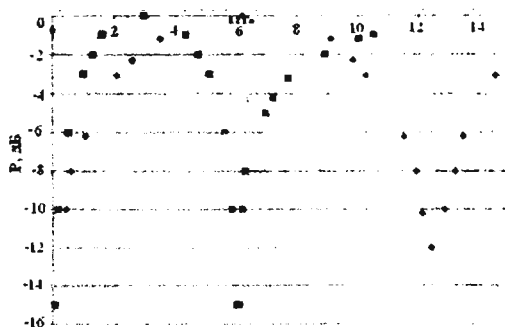


Рис. 7. Экспериментальные частотные характеристики ФФМС: при частотном разnose коэффициентов $f=10$ ГГц (ромбовидные маркеры) и при частотном разnose коэффициентов $f=20$ ГГц (квадратные маркеры) с модуляцией АЭОММЦ в нулевой рабочей точке

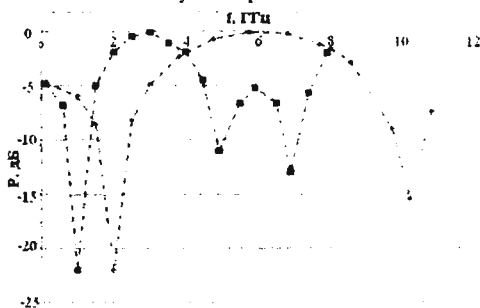


Рис. 8. Экспериментальные частотные характеристики ФФМС: при частотном разnose коэффициентов $f=10$ ГГц (ромбовидные маркеры) и при частотном разnose коэффициентов $f=20$ ГГц (круглые маркеры) с модуляцией АЭОММЦ в максимальной рабочей точке

шетки Брэгга и выходного волокна модулятора канала фильтрации, а также наличием в выходном спектре АЭОММЦ паразитных гармоник.

Экспериментально показано изменение центральной длины волны канала пропускания фильтра путем изменения частоты модулирующего сигнала в КФК. Показано, что переконфигурация фильтра может быть осуществлена переключением положения рабочей точки на модуляционной характеристике. Результаты экспериментального исследования позволяют с уверенностью говорить о возможности реализации предложенных подходов в формировании коэффициентов фильтра и реализации модуляционных методов в синтезе ФФМС с высокими динамическими и статическими характеристиками. При сравнении данного ФФМС с другими разработками, реализующими модуляционные методы синтеза коэффициентов, можно уверенно говорить о преимуществе в динамических характеристиках: показан синтез полосового и ВЧ- фильтров, тогда как аналоги реализуют лишь АЧХ ФНЧ.

Совокупность результатов проведенных в третьей главе исследований говорит о необходимости осуществления контроля положения рабочей точки в целях повышения статических характеристик разработанного ФФМС. Было предложено стабилизировать положение рабочей точки следующими способами. Способ, реализованный в КФК, заключается в регистрации сигнала на частоте модулирующего сигнала, при его наличии делается вывод о смещении рабочей точки из начального нулевого или максимального положения. Способ, реализованный в КФМС, заключается в анализе разности фаз биений двух двухчастотных сигналов, один из которых является опорным, а другой прошел через ФФМС, и определении его коэффициента модуляции. Разработанные структурные схемы блоков стабилизации, реализующие указанные методы, были реализованы в экспериментальной установке.

В заключении главы были рассмотрены вопросы применения многочастотных излучений, полученных с помощью одночастотного лазерного источника и АЭОММЦ, в смежной области – передаче микроволновых сигналов по волокну (ROF-сети): гетеродинирование несущих, осуществление компенсации помех четырехволнового смещения, детектирование нелинейных эффектов рассеяния, формирование подсистем распределенного мониторинга.

3 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Совокупность результатов проведенных научных исследований можно квалифицировать как решение актуальной научно-технической задачи улучшения динамических, статических и конструктивных характеристик ФФМС, основанного на использовании модуляционного преобразования одночастотного лазерного излучения в многочастотное, реализуемого в АЭОММЦ.

Основные выводы по работе можно сформулировать в виде следующих положений:

1. На основе систематизации и анализа модуляционных и немодуляционных методов синтеза ФФМС определены возможные пути улучшения их дина-

мических, статических и конструктивных характеристик. Показано, что дальнейшее развитие ФФМС может быть основано на использовании модуляционных методов формирования требуемого числа и знака коэффициентов фильтров с помощью источника одночастотного лазерного излучения и преобразования последнего в многочастотное с помощью внешнего ЭОММЦ.

2. С указанных позиций проведены исследования методов модуляционно-го преобразования и соответствующих им выходных сигналов ЭОММЦ в различных рабочих точках модуляционной характеристики по напряженности электрического поля. Для сравнения были выбраны фазовые ЭОММЦ, а также одно- и двухпортовые амплитудные. Получены соотношения, позволяющие качественно и количественно оценить спектральную структуру коэффициентов фильтров и определить соответствующие им синтезируемые АЧХ ФФМС. Впервые показано получение отрицательных коэффициентов, достигаемое модуляционным преобразованием одночастотного лазерного излучения в нулевой и максимальной рабочей точке АЭОММЦ, что принципиально необходимо для синтеза полосовых фильтров и фильтров высоких частот. Дано обоснование применения однопортового АЭОММЦ для максимально качественного улучшения динамических характеристик ФФМС, заключающегося в возможности изменения его конфигураций от НЧ к ВЧ и полосовому с изменением полосы пропускания, центральной частоты, вносимого затухания в полосе задержки, достигаемое, в отличие от существующих разработок, за счет изменения параметров только одного управляющего сигнала.

3. На основании полученных соотношений с позиций анализа и численной оценки искажений структурного состава коэффициентов фильтра и формируемых АЧХ, вызванных отклонениями параметров модуляции от оптимальных, впервые исследованы статические характеристики ФФМС, построенных на основе одночастотного лазера и однопортового АЭОММЦ. В качестве искажающих факторов рассматривались нестабильности мощности и длины волны лазерного источника, положения рабочей точки модулятора, напряжения и частоты модулирующего сигнала. В сравнении с ФФМС на основе группы источников опорного излучения показан выигрыш в 2-3 раза по стабильности полосы пропускания фильтра, определяемой нестабильностью длины волны лазера. Результаты исследований по другим дестабилизирующим факторам могут быть использованы для модернизации существующих ФФМС и разработки новых. В частности, показано, что статические характеристики ФФМС, использующих ЭОММЦ, в большей степени определяются нестабильностью положения рабочей точки модулятора. Предложены методы стабилизации параметров преобразования частоты и структурные схемы блоков, обеспечивающие улучшение статических характеристик фильтра на основе мониторинга положения рабочей точки ЭОММЦ. Новизна и полезность данного подхода подтверждена патентом на полезную модель.

4. На базе полученных результатов разработаны ФФМС на основе одночастотного лазера и АЭОММЦ, которые характеризуются обеспечением высоких динамических, статических и конструктивных характеристик, что подтвер-

ждено результатами их экспериментальных исследований. Разработанные ФФМС с использованием блока слежения за положением рабочей точки модулятора позволяют синтезировать АЧХ фильтров низких и высоких частот, а также полосовых фильтров с диапазоном перестройки центральной частоты, полосы пропускания, ослабления в полосе задержки, определяемых параметрами модулирующего сигнала. Показаны перспективные области приложения разработанных модуляционных методов преобразования частоты в различных радиотехнических, метрологических и телекоммуникационных задачах.

5. Результаты диссертационной работы внедрены на ряде предприятий в виде опытных образцов ФФМС, данных теоретических и экспериментальных исследований, методик проектирования и расчета и учебно-методических материалов.

4 СПИСОК РАБОТ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Айбатов Д.Л. Преобразование спектра оптического излучения в двухканальном модуляторе Маха-Цендера и ROF-фильтр на его основе / Д.Л. Айбатов, О.Г. Морозов, Т.С. Садеев // Нелинейный мир. – 2010. – Т.8. - №5. – С.302-309.

2. Морозов О.Г. Синтез двухчастотного излучения и его применение в волоконно-оптических системах распределенных и мультиплексированных измерений / О.Г. Морозов, Д.Л. Айбатов, Т.С. Садеев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2010. - Т.13, №3. - С. 84-91.

3. Садеев Т.С. Спектральные характеристики фотонных фильтров микроволновых сигналов на основе амплитудных электрооптических модуляторов / Т.С. Садеев, О.Г. Морозов // Вестник МарГТУ. Серия радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – Т.10 - №3. – С.22 – 30.

Публикации в иностранных изданиях:

4. Morozov O.G. Double mode system for FWM reducing / O.G. Morozov, T. S. Sadeev, O. G. Natanson, A. S. Smirnov, A. A. Talipov // Optical Technologies for Telecommunications. - Proc. SPIE V.7026. - 2007. – Ufa. - P. 702603 - 1 – 702603 - 6.

5. Morozov O.G. All-optical microwave filter for ROF WDM systems based on double-mode method / O.G. Morozov, T. S. Sadeev, A. A. Talipov // Optical Technologies for Telecommunications. - Proc. SPIE V.7374. - 2008. – Kazan. - P. 73740A1 – 73749A1.

6. Morozov O.G. Bandwidth expansion approach for DWDM deployment in O – band / O.G. Morozov, T. S. Sadeev, A. A. Talipov // Optical Technologies for Telecommunications. - Proc. SPIE V.7374. - 2008. – Kazan. - P. 737403 - 1 – 737403 - 6.

7. Morozov O.G. Analysis of optical communication systems simulation software for educational purposes / O.G. Morozov, T. S. Sadeev, G.G. Khusainova //

Optical Technologies for Telecommunications. - Proc. SPIE V.7523. - 2009. - Samara. - P. 752302 - 1 – 752302 - 7.

8. Morozov O.G. All-optical microwave photonic filter based on two-frequency optical source/ O.G. Morozov, T. S. Sadeev // Optical Technologies for Telecommunications. - Proc. SPIE V.7992. - 2010. - Ufa. - P.799211 - 1–799211 - 7.

9. Aybatov D.L. Dual port MZM based optical comb generator for all-optical microwave photonic devices/ D.L. Aybatov, O.G. Morozov, T. S. Sadeev // Optical Technologies for Telecommunications. - Proc. SPIE V.7992. - 2010. – Ufa. - P. 799201 - 1 –799201 - 8.

Патент РФ на полезную модель:

10. Пат. 102256 Российская Федерация МПК G01K 11/32. Устройство для измерения параметров физических полей / Морозов О.Г., Садеев Т.С., Айбатов Д.Л., Степушенко О.А., Нургазизов М.Р.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ПГУТИ. №2010137130/28; заявл. 06.09.2010 ; опубл. 20.02.2011, Бюл. №5.

Другие издания:

11. Морозов О.Г. Методы контроля нелинейных эффектов в оптических волокнах / О.Г. Морозов, Т.С. Садеев // Труды V Международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов». – 2006. – Самара. – С.276-277.

12. Морозов О.Г. Исследование характеристик колебания, используемого для подавления продуктов ЧВС / О.Г. Морозов, Т.С. Садеев // Труды VI Международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов». – 2007. – Казань. – С.291-292.

13. Морозов О.Г. Двухчастотные лазерные излучатели для систем мониторинга нелинейных рассеяний ВОЛП / Т.О.Г. Морозов, Д.Л. Айбатов, Т.С. Садеев // Труды VI Международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов». – 2007. – Казань. – С.276-277.

14. Морозов О.Г. Двухчастотный детектор рамановского и бриллюэновского рассеяния / О.Г. Морозов, Д.Л. Айбатов, Т.С. Садеев // Труды VI Международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов». – 2007. – Казань. – С.299-301.

15. Садеев Т.С. Влияние дисперсии волокна на фазы компонент многочастотных сигналов в микроволновых полосовых фильтрах / Т.С. Садеев, О.Г. Морозов // Тезисы докладов Всероссийской (с международным участием) молодежной научной конференции «XVII Туполевские чтения». – Т. IV. – 2009. – Казань. – С.488-490.

16. Садеев Т.С. Исследование возможности применения двухчастотного излучателя в задачах измерения хроматической дисперсии волокна / Т.С. Садеев, О.Г. Морозов // Тезисы докладов Всероссийской (с международным участием) молодежной научной конференции «XVII Туполевские чтения». – Т. IV. – 2009. – Казань. – С.476-477.

17. Морозов О.Г. Исследование влияния оптического сигнала на передаточную функции полностью оптического фильтра мм-диапазона / О.Г. Моро-

102
зов, Т.С. Садеев // Труды VIII Международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов». – 2009. – Санкт - Петербург. – С.259.

18. Морозов О.Г. Двухчастотные методы анализа и синтеза полностью оптических фильтров для измерительных ROF систем миллиметрового диапазона/ О.Г. Морозов, Т.С. Садеев, В.П. Просвирин, А.С. Смирнов, А.А. Талипов // Сборник трудов «III Российского семинара по волоконным лазерам». – 2009. – Уфа. – С.126-127.

19. Морозов О.Г. Формирования передаточной характеристики полностью оптического фильтра мм-диапазона на основе многочастотного источника излучения / О.Г. Морозов, Т.С. Садеев // Труды IX Международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов». – 2010. – Челябинск. – С.132-133.

20. Морозов О.Г. Дисперсия в вопросах синтеза и анализа систем мониторинга ВОЛС/ О.Г. Морозов, Т.С. Садеев, В.П. Просвирин, А.С. Смирнов, А.А. Талипов // Сборник трудов «IV Российского семинара по волоконным лазерам». – 2010. – Ульяновск. – С.100-101.

Подписано к печати 14.03.11 г.

Формат 60x84_{1/16}. Бумага офсетная. Печать ризографическая.

Гарнитура "Таймс". Усл. печ.л. 1,6. Уч.-изд.л. 1,25.

Тираж 100. Заказ 03/05.

Издательство ЗАО «Новое знание».

420029. г.Казань, ул.Сибирский тракт, д.34, корп. 10, офис 6.

Отпечатано с готового оригинал-макета

на полиграфическом участке ЗАО «Новое знание».

420029, г.Казань, ул.Сибирский тракт, д.34, корп. 10, офис 6.